

Anmelder: Universität Heidelberg  
"Detektor"  
Unser Zeichen: H 2154EU - ds / ro / ed

5

### Beschreibung

- Die Erfindung betrifft einen Detektor zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen gemäß Anspruch 1, eine Konvertereinrichtung für einen Detektor zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen gemäß Anspruch 11, ein Herstellungsverfahren für eine Konvertereinrichtung gemäß Anspruch 13 sowie ein Detektionsverfahren zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen gemäß Anspruch 14.
- 15 Die Nutzung von Neutronenstrahlung niedriger Energie, sogenannte thermische und kalte Neutronen, stellt eine wichtige Methode in der Wissenschaft (beispielsweise physikalische, chemische, biologische und medizinische Anwendungen) und Technik (beispielsweise die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung) dar. Grundlegend für sämtliche Anwendungsgebiete in
- 20 Wissenschaft und Technik ist der Nachweis, d.h. die Detektion, solcher Neutronen, wodurch Detektoren bzw. Detektionsverfahren für Neutronen in den letzten Jahrzehnten eine große wirtschaftliche Bedeutung erlangt haben. Der Nachweis von Neutronen kann aus physikalischen Gründen nur über eine Kernreaktion derselben mit einem sogenannten Neutronenkonverter realisiert
- 25 werden. Dabei werden die Neutronen von den Atomkernen des Konverters eingefangen bzw. absorbiert, wobei diese Kerne daraufhin spontan zerfallen. Die beim Zerfall entstehenden meist energiereichen und elektrisch geladenen Fragmente, welche gemeinhin als Konvertierungsprodukte bezeichnet werden, können dann aufgrund ihrer ionisierenden Wirkung nachgewiesen werden.
- 30
- Zum Nachweis von Neutronen kommt bisher überwiegend das Gas Helium-3, dessen Atomkerne aus zwei Protonen und einem Neutron bestehen, zum Einsatz. Dieses Heliumisotop wird in sogenannten Gasedektoren dem eigentlichen Zählgas des Detektors in vorbestimmten Mengen hinzugefügt. Nachzuweisend
- 35 Neutronen werden von den Helium-3-Kern n absorbiert, welche nachfolgend gemäß der Kernreaktion  ${}^3\text{He} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{p} + 764 \text{ keV}$  spontan zerfallen, wobei

10047556-102301

der Tritium-Kern ein Viertel und das Proton Dreiviertel der Reaktionsenergie erhält. Diese Konvertierungsprodukte haben als energiereiche, geladene Teilchen eine ionisierende Wirkung auf das Zählgas eines derartigen Gasdetektors. Beim Nachweis von Neutronen mittels Helium-3-Gasdetektoren erzeugen die

5 Konvertierungsprodukte in dem Zählgas somit geladene Teilchen, insbesondere freie Elektronen. Durch Anlegen eines elektrischen Driftfeldes werden diese primären Elektronen zu den Elektroden einer Auslesestruktur geführt. Durch eine entsprechende Formgebung der Auslesestruktur ist das elektrische Feld in der Nähe der Elektroden so hoch, daß die primäre Ladung mit Hilfe von sekundären

10 Gasionisationsprozessen enorm verstärkt werden kann (Gasverstärkung). Die so erzeugte Gesamtladung wird nachfolgend an den Elektroden aufgesammelt und über einen Vorverstärker einer elektronischen Auswerteeinrichtung zugeführt.

Derartige Neutronendetektoren in Form herkömmlicher Gasdetektoren mit Helium-

15 3 als Neutronenkonverter weisen jedoch beachtliche Nachteile auf. Um nämlich bei einem gasförmigen Neutronenkonverter wie Helium-3 eine attraktive Nachweiseffizienz von z.B. etwa 50% für thermische Neutronen zu erlangen und gleichzeitig den Ort des Auftreffens der Neutronen bestimmen zu können, müssen solche Detektoren bei einem Gasdruck von 5 bis 10 bar betrieben werden. Dies

20 erfordert - aufgrund des hohen Betriebsdrucks - aufwendige und teure Druckbehälter. Ein Nachweis von Neutronen über große Detektionsflächen kann aufgrund der konstruktiven Beschränkungen der Druckbehälter nur mit Hilfe von großen, matrixartigen Detektoranordnungen, welche aus einer Vielzahl kleiner Einzeldetektoren bestehen, realisiert werden. Beispielsweise weist der IN5-

25 Neutronenspektrometer des Instituts Laue-Langevin in Grenoble zum winkelaufgelösten Neutronennachweis 1400 einzelne Helium-3-Neutronendetektoren auf (vgl. "The yellowbook guide to neutron research facilities at ILL", Institut Laue- Langevin, Grenoble, Dezember 1997). Das räumliche Auflösungsvermögen von ca. 2 cm x 10 cm und die typische Zählratenakzeptanz

30 von 10 000 nachgewiesenen Neutronen pro Sekunde und cm<sup>2</sup> eines derartigen Neutronendetektors sind jedoch sehr unbefriedigend.

10047556-102301

Zwar kann das schlechte Auflösungsvermögen und die geringe Zählratenakzeptanz durch eine Kombination von Helium-3 als Konverter mit einem sogenannten Mikrostreifen-Detektor (MSGC) auf ca. 2 mm x 2 mm und eine Millionen Neutronen pro Sekunde und cm<sup>2</sup> verbessert werden (vgl. Vellezz  
5 et al., "Two-dimensional gaseous microstrip detector for thermal neutrons", Nuclear Instruments and Methods A 392 (1997), Seite 73 bis 79). Diese Detektoren sind jedoch wegen des hohen Gasdrucks bereits bei einer Detektorfläche von lediglich 100 mm x 100 mm in ihrem Aufbau sehr aufwendig und teuer. Ferner hat sich die MSGC-Technologie als sehr störanfällig erwiesen.  
10 Ein weiterer Nachteil besteht in der schlechten Zeitauflösung der bisher beschriebenen Gasdetektoren. Da thermische Neutronen irgendwo in der Tiefe des Gasvolumens absorbiert werden, sind der Ort der Neutronenabsorption und damit die Durchflugszeit durch den Detektor nicht genau bekannt. Die Ungenauigkeit in der Durchflugszeit und damit in der Zeitauflösung beträgt für  
15 thermische Neutronen bei typischen Tiefen des absorbierenden Gasvolumens von ca. 2 cm etwa 10 µs.

Zum Nachweis von Neutronen sind ferner Neutronen-Szintillationsdetektoren bekannt. Bei derartigen Detektoren wird ein fester Neutronenkonverter einem  
20 festen oder flüssigen Szintillator, beispielsweise in Form eines feinen Pulvers, beigemischt (vgl. G.B. Spector et al., "Advances in terbium-doped, lithium-loaded scintillator glass development", Nuclear Instruments and Methods A 326 (1993), Seiten 526 bis 530). Die Konvertierungsprodukte, welche bei einer Neutronen-nachweisreaktion entstehen, deponieren ihre Energie im Szintillator. Das vom  
25 Szintillator daraufhin abgestrahlte Licht wird dann ortsempfindlich mit einem geeigneten Lichtdetektionssystem nachgewiesen. Solche Detektoren weisen typische Nachweiseffizienzen von 20% bis 40% auf. Problematisch ist jedoch der Nachweis des Szintillationslichtes. Da solche Detektionskonzepte eine vergleichsweise hohe Empfindlichkeit gegenüber Röntgen- und Gammastrahlung  
30 besitzen, welche in einer Reaktor- bzw. Neutronenumgebung nicht vermeidbar ist, sind sie bezüglich ihrer Anwendungsmöglichkeiten stark eingeschränkt. Insbesondere macht dieser auf Röntgen- und Gammastrahlung zurückzuführende Untergrund solche Detektoren für den Einzelnachweis von Neutronen bzw. den

10047556 - 102301

Nachweis sehr geringer Neutronenintensitäten untauglich, so daß derartige Detektorsysteme nur Verteilungen intensiver Ereignisraten ortsabhängig detektieren können.

- 5 Es ist Aufgabe der Erfindung, einen Detektor für elektrisch neutrale Teilchen, insbesondere Neutronen, anzugeben, welcher eine hohe Nachweisempfindlichkeit mit einem konstruktiv einfachen und damit kostengünstigen Aufbau verbindet. Ferner ist es Aufgabe der Erfindung, eine Konvertereinrichtung für einen derartigen Detektor zum Nachweis neutraler Teilchen sowie ein entsprechendes
- 10 Herstellungsverfahren der Konvertereinrichtung anzugeben. Schließlich ist es Aufgabe der Erfindung, ein entsprechendes Verfahren zum Detektieren elektrisch neutraler Teilchen vorzuschlagen.

- Die jeweiligen Aufgaben werden durch einen Detektor gemäß Anspruch 1, eine
- 15 Konvertereinrichtung gemäß Anspruch 11, ein Verfahren zur Herstellung einer Konvertereinrichtung gemäß Anspruch 13 sowie ein Detektionsverfahren gemäß Anspruch 14 gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

- 20 Gemäß der Erfindung umfaßt ein Detektor zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen, insbesondere Neutronen,
- ein zumindest bereichsweise mit einem Zählgas gefülltes Detektorgehäuse,
  - zumindest eine in dem Gehäuse angeordnete Konvertereinrichtung, welche Konvertierungsprodukte aufgrund einer Absorption der zu detektierenden
- 25 neutralen Teilchen generiert, wobei die Konvertierungsprodukte elektrisch geladene Teilchen in dem Zählgas erzeugen,
- zumindest eine Ausleseeinrichtung zum Nachweis der elektrisch geladenen Teilchen,
  - zumindest eine Driffelderzeugungseinrichtung zum Erzeugen eines
- 30 derartigen elektrischen Driffeldes für die elektrisch geladenen Teilchen in zumindest einem Volumenbereich des Zählgases, so daß die elektrisch geladenen Teilchen zumindest teilweise zu der Ausleseeinrichtung driften,

10047556-102301

wobei die Konvertereinrichtung ladungstransparent ausgelegt und derartig in dem Detektorgehäuse angeordnet ist, daß sie von dem Driftfeld zumindest teilweise durchsetzt ist.

- 5 Der erfindungsgemäße Detektor ist zum Nachweis von elektrisch neutralen Teilchen, insbesondere Neutronen sowie anderer neutraler Teilchen, insbesondere Photonen ausgelegt. Das Nachweisprinzip beruht darauf, daß die neutralen Teilchen mit einer Konvertereinrichtung wechselwirken, welche aufgrund dieser Wechselwirkung (beispielsweise einer Kernreaktion)
- 10 Konvertierungsprodukte generiert. Die Konvertereinrichtung enthält hierzu vorzugsweise ein festes Konvertermaterial. Die Konvertierungsprodukte ionisieren nachfolgend das Zählgas bzw. das Gas, mit welchem das Detektorgehäuse zumindest bereichsweise gefüllt ist und welches die Konvertereinrichtung zumindest bereichsweise umgibt. Hierdurch werden elektrisch geladene Teilchen,
- 15 insbesondere Elektronen, erzeugt, welche in dem Zählgas unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes beweglich sind. Um die elektrisch geladenen Teilchen nachweisen zu können, werden sie unter dem Einfluß eines elektrischen Driftfeldes einer Ausleseeinrichtung zugeführt. Hierzu weist der Detektor eine Driftfelderzeugungseinrichtung auf, welche insbesondere getrennt von der
- 20 Konvertereinrichtung und der Ausleseeinrichtung bereitgestellt sein kann. Es ist jedoch gleichermaßen möglich, die Driftfelderzeugungseinrichtung als Bestandteil der Konvertereinrichtung zu gestalten. Auch die Ausleseeinrichtung kann zur Erzeugung des Driftfeldes miteinbezogen werden, so daß die Driftfelderzeugungseinrichtung insbesondere durch eine besondere Ausgestaltung
- 25 der Konverter- und Ausleseeinrichtung verwirklicht werden kann. Erfindungsgemäß ist die zumindest eine Konvertereinrichtung ladungstransparent ausgebildet, d.h. sie besitzt einen hohen Transmissionskoeffizienten für die elektrisch geladenen Teilchen. Vorzugsweise können die elektrisch geladenen Teilchen unter Beibehaltung ihrer Ortsinformation die Konvertereinrichtung
- 30 passieren bzw. durchsetzen.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform weist die Konvertereinrichtung eine Vielzahl von vorzugsweise matrixartig angeordneten Durchgängen für die

100455-10201

elektrisch geladenen Teilchen auf. Alternativ ist auch möglich, eine statistische bzw. zufällig Anordnung der Durchgänge einzusetzen, so daß die Durchgänge beispielsweise ein beliebig verteiltes Lochmuster darstellen. Die Durchgänge können beispielsweise als geometrisch ausgebildete Durchbrüche bzw. Löcher in der Konvertereinrichtung ausgebildet sein. Ferner kann ein Durchgang auch durch eine ladungstransparente Zone gebildet werden, welche einen im Vergleich zu dem angrenzenden Material nur kleinen Wechselwirkungsquerschnitt für die elektrisch geladenen Teilchen hat, um so einen hohen Transmissionskoeffizienten für die geladenen Teilchen aufzuweisen. Besonders bevorzugt weist die Konvertereinrichtung eine regelmäßige Matrix von kreisförmigen Durchbrüchen auf.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform weisen die Durchgänge einen Minstdurchmesser zwischen 10 µm bis 1000 µm, vorzugsweise 25 µm bis 500 µm und einen Mindestabstand voneinander von 10 µm bis 500 µm, vorzugsweise 15 µm bis 300 µm auf.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform weist der Detektor eine Vielzahl, vorzugsweise 2 bis 20, am meisten bevorzugt 10, von (hintereinander) kaskadiert angeordneten Konvertereinrichtungen auf. Insbesondere können die Konvertereinrichtungen jeweils voneinander beabstandet, stapelartig in dem Detektorgehäuse angeordnet werden, so daß sich zwischen den Konvertereinrichtungen das Zählgas befindet. Hierdurch ergibt sich eine große wirksame Fläche für die zum Nachweis der neutralen Teilchen notwendigen Wechselwirkung mit der Konvertereinrichtung. Aufgrund der Ladungstransparenz der Konvertereinrichtungen können die durch die Konvertierungsprodukte erzeugten geladenen Teilchen, deren Detektion den Nachweis der neutralen Teilchen ermöglicht, durch die Kaskade der Konvertereinrichtungen mittels des Driftfeldes zu der Ausleseeinrichtung bewegt werden. Die Verwendung kaskadiert angeordneter Konvertereinrichtungen in dem erfindungsgemäßen Detektor ermöglicht demgemäß eine enorme Steigerung der verfügbaren Wechselwirkungsfläche für die elektrisch neutralen Teilchen und damit eine beachtliche Steigerung der Nachweisempfindlichkeit.

10047556-102301

- Vorzugsweise ist ein für die Konvertierung der elektrisch neutralen Teilchen aktiver Bereich der Konvertereinrichtung flächenartig - insbesondere planar - ausgelegt und bevorzugt im wesentlichen senkrecht in dem Driftfeld angeordnet.
- 5 Neben planaren Flächen sind auch beliebig gekrümmte flächenartige Strukturen denkbar, beispielsweise zylinderförmige Strukturen. Dieser flächen- bzw. schichtartige Aufbau der Konvertereinrichtung ermöglicht eine weitere Verbesserung des Oberflächen- zu Volumenverhältnisses der Konvertereinrichtung. Da nämlich typischerweise zwar das (feste)
- 10 Konvertermaterial im gesamten Volumen empfindlich für die zu detektierenden neutralen Teilchen ist, die Konvertierungsprodukte jedoch oftmals nur eine verhältnismäßig geringe Reichweite in dem Konvertermaterial haben und somit aus diesem nur austreten können, wenn sie ausreichend dicht an dessen Oberfläche liegen, ist es für die Erzielung einer hohen Nachweisempfindlichkeit
- 15 vorteilhaft, bei gegebenem Konvertervolumen bzw. -masse eine möglichst große Konverterfläche zur Detektion zur Verfügung zu haben. Eine besondere effiziente und schnelle Ableitung der erzeugten geladenen elektrischen Teilchen zu der Ausleseeinrichtung gelingt dann, wenn die Konvertereinrichtung im wesentlichen senkrecht in dem Driftfeld angeordnet ist. Demgemäß ist vorteilhafterweise die
- 20 durchschnittliche Feldrichtung des Driftfelds im wesentlichen parallel zu der Oberflächennormale der flächenartig ausgebildeten Konvertereinrichtung. Auch eine geneigte Anordnung der Konvertereinrichtung ist möglich, solange die Ebene der flächigen Konvertereinrichtung nicht parallel zu dem Driftfeld verläuft.
- 25 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform weist die Driftfelderzeugungseinrichtung eine flächenartige, gegebenenfalls strukturierte Dritelektrode auf, um das Driftfeld zwischen der Dritelektrode und der Ausleseeinrichtung zu erzeugen. Für den Nachweis von Elektronen, welche in dem Zählgas durch die Konvertierungsprodukte erzeugt wurden, wird die
- 30 Dritelektrode bezüglich zu der Ausleseeinrichtung negativ vorgespannt. Auf die Dritelektrode kann verzichtet werden, wenn deren Funktion durch eine Elektrodenschicht der Konvertereinrichtung übernommen wird.

10047556-102301

- Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform umfaßt die Konvertereinrichtung eine erste und zweite leitfähige Schicht, welche durch eine dazwischen angeordnete Isolatorschicht elektrisch gegeneinander isoliert sind, und zumindest eine vorzugsweise an der ersten und/oder zweiten leitfähigen Schicht angeordnete Konverterschicht. Die Konvertereinrichtung weist somit einen Schichtaufbau auf. Als Isolatorschicht kommt beispielsweise eine Kunststoffolie, insbesondere Polyimidfolie zum Einsatz. Besonders bewährt haben sich sogenannte Kaptonfolien (Kapton ist eine Marke des Unternehmens DUPONT).
- 5
- 10 Durch diese Isolierschicht werden die beiden leitfähigen Schichten elektrisch gegeneinander isoliert. Vorzugsweise handelt es sich bei den leitfähigen Schichten um Metallschichten, welche durch ein Beschichtungsverfahren direkt auf die Isolierschicht aufgebracht wurden. Insbesondere kommen für die leitfähigen Schichten Kupferschichten in Betracht. Die schichtartig aufgebaute
- 15 Konvertereinrichtung umfaßt ferner eine Konverterschicht, welche vorzugsweise an der der Isolatorschicht abgewandten Fläche der ersten und/oder zweiten leitfähigen Schicht angeordnet ist. Gleichmaßen kann die Konverterschicht jedoch auch zwischen einer der insbesondere dünnen und strukturierten leitfähigen Schichten und der Isolatorschicht angeordnet sein. Wenn die
- 20 Konverterschicht als leitfähige Schicht ausgelegt werden kann, kann auf eine zusätzliche leitfähige Schicht der Konvertereinrichtung verzichtet werden.

- Eine derartige, besonders bevorzugte schichtartige Konvertereinrichtung kann mittels sogenannter GEM-Folien (Gas electron multiplier - Folien) hergestellt werden, wie sie beispielsweise in US-A-6 011 265 sowie in der Veröffentlichung von F. Sauli in Nucl. Inst. and Methods A 386 (1997) Seite 531 bis 543 beschrieben sind. Bei diesen in den angegebenen Druckschriften beschriebenen GEM-Folien handelt es sich um beidseitig mit Kupfer beschichtete Kaptonfolien, welche 1997 am CERN von F. Sauli entwickelt wurden. Mittels eines
- 25
- 30 photolithographischen Verfahrens wird in diese GEM-Folien eine regelmäßige Lochstruktur geätzt, wobei Kupferober- und -unterseite der Folien elektrisch nicht miteinander verbunden sind. Auf die detaillierte Offenbarung hinsichtlich der Herstellung, des Aufbaus sowie der elektrischen Beschaltung und übriger

10047556-102301



Eigenschaften der GEM-Folien wird in vollem Umfang für die Offenbarung der vorliegenden Erfindung auf die oben angegebenen Druckschriften Bezug genommen, so daß die Offenbarung dieser Druckschriften integraler Bestandteil der Offenbarung der vorliegenden Erfindung sein soll. Auf eine vollständige  
5 Wiederholung der in diesen Druckschriften dargelegten detaillierten Beschreibung der GEM-Folien kann somit verzichtet werden.

Die beschriebene schichtartig aufgebaute Konvertereinrichtung unterscheidet sich jedoch gegenüber den von F. Sauls vorgeschlagenen GEM-Folien insbesondere  
10 durch die zusätzlich vorhandene Konverterschicht. Ferner werden die GEM-Folien in den Anwendungen, die in den genannten Druckschriften diskutiert werden, ausschließlich in einem Gasverstärkungsmodus betrieben. Dort werden durch eine geeignete elektrische Beschaltung derartige Feldstärken zwischen den beiden leitfähigen Schichten aufgebaut, daß es zu einer lawinenartigen  
15 Vermehrung der Primärelektronen kommt, so daß die Folien einen "gas electron multiplier" (GEM) darstellen. Vorzugsweise werden die Konvertereinrichtungen gemäß der vorliegenden Erfindungen jedoch nicht in einem derartigen Gasverstärkungsmodus betrieben, sondern es wird lediglich die ladungstransparente Eigenschaft der GEM-Folien ausgenützt.

20 Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform sind die erste und zweite leitfähige Schicht der Konvertereinrichtung über eine Konverterfelderzeugungseinrichtung elektrisch miteinander verbunden. Die Konverterfelderzeugungseinrichtung ermöglicht die Erzeugung eines elektrischen  
25 Driftfeldes, welches insbesondere zusätzlich zu dem von der Driftfelderzeugungseinrichtung erzeugten Driftfeld wirken kann. Hierdurch wird sichergestellt, daß die elektrisch geladenen Teilchen effizient durch die Konvertereinrichtung geführt werden können.

30 Vorzugsweise enthält die (feste) Konverterschicht eine Neutronenkonverterschicht, so daß der Detektor zum Nachweis von Neutronen geeignet ist, wobei die Neutronenkonverterschicht insbesondere Lithium-6, Bor-10, Gadolinium-155, Gadolinium-157 und/oder Uran-235 enthält. Sollen als

10047555-10201

neutral Teilchen UV- und/oder Röntgenphotonen nachgewiesen werden, so kommt insbesondere Csl als Material für die Photon konverterschicht in Betracht.

- 5 Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform weist die Konverterschicht eine Schichtdicke von 0,1  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ , vorzugsweise für eine im wesentlichen aus Bor-10 bestehenden Neutronenkonverterschicht zwischen 0,5  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$ , am meisten bevorzugt etwa 1  $\mu\text{m}$ , die erste und zweite leitfähige Schicht eine Schichtdicke von 0,1  $\mu\text{m}$  bis 20  $\mu\text{m}$ , vorzugsweise 0,2  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  und die
- 10 Isolatorschicht eine Schichtdicke von 10  $\mu\text{m}$  bis 500  $\mu\text{m}$ , vorzugsweise 25  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$  auf.

- Gemäß der Erfindung umfaßt eine Konvertereinrichtung für einen Detektor zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen, insbesondere Neutronen, eine erste und
- 15 zweite leitfähige Schicht, welche durch eine dazwischen angeordnete Isolatorschicht gegeneinander elektrisch isoliert sind, und zumindest eine bevorzugt an der ersten und/zweiten leitfähigen Schicht angeordnete (feste) Konverterschicht, wobei die Konvertereinrichtung eine Vielzahl von vorzugsweise matrixartig angeordneten Durchgängen für elektrisch geladene Teilchen aufweist.
- 20 Eine derartige Konverterschicht kann in Verbindung mit einem herkömmlichen Gasdetektor zum einfachen und hochempfindlichen Nachweis von neutralen Teilchen, insbesondere Neutronen, verwendet werden. Hierzu wird die Konvertereinrichtung in das Driftfeld des Gasdetektors eingebracht. Besonders bevorzugt kommt nicht eine einzelne Konvertereinrichtung, sondern ein "Stapel"
- 25 von kaskadierten Konvertereinrichtungen zum Einsatz, wodurch sich die Nachweisempfindlichkeit enorm steigern läßt.

- Vorzugsweise enthält die Konvertereinrichtung ein Neutronenkonvertermaterial, so daß die Konvertereinrichtung für einen Detektor zum Nachweis von Neutronen
- 30 ausgelegt ist, wobei das Neutronenkonvertermaterial insbesondere Lithium-6, Bor-10, Gadolinium-155, Gadolinium-157 und/oder Uran-235 enthält.

10047556-102301

Gemäß der Erfindung umfaßt ein Verfahren zur Herstellung einer Konvertereinrichtung für einen Detektor zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen, insbesondere Neutronen, die Schritte:

- Vorsehen einer zwischen zwei elektrisch leitfähigen Schichten angeordneten Isolatorschicht, so daß die elektrisch leitfähigen Schichten gegeneinander elektrisch isoliert sind; und
  - Vorsehen einer Konverterschicht, insbesondere einer Neutronenkonverterschicht.
- 10 Die Neutronenkonverterschicht enthält hierbei vorzugsweise zumindest ein oben genanntes Neutronenkonvertermaterial. Wie oben beschrieben kann die erfindungsgemäße Konvertereinrichtung insbesondere aus einer sogenannten GEM-Folie hergestellt werden, auf welche eine zusätzliche Konverterschicht aufgebracht wird. So kann beispielsweise auf eine GEM-Folie mittels
- 15 Elektronenstrahlverdampfen eines Bor-10 Pulvers oder Granulats eine Bor-10 Schicht aufgedampft werden.

Erfindungsgemäß umfaßt ein Detektionsverfahren zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen, insbesondere Neutronen, die Schritte:

- 20 - Auffangen der zu detektierenden elektrisch neutralen Teilchen mit zumindest einer Konvertereinrichtung, welche bei Absorption der neutralen Teilchen Konvertierungsprodukte generiert;
- Erzeugen von elektrisch geladenen Teilchen in einem Zählgas bzw. Gas durch die Konvertierungsprodukte;
- 25 - Ableiten bzw. Beschleunigen der elektrisch geladenen Teilchen in einem elektrischen Driftfeld zu einer Ausleseeinrichtung, wobei die elektrisch geladenen Teilchen zumindest teilweise durch die ladungstransparente Konvertereinrichtung hindurchgeleitet werden, insbesondere durch eine Vielzahl vorzugsweise matrixartig angeordneter Durchgänge in der
- 30 Konvertereinrichtung; und
- Nachweisen der elektrisch geladenen Teilchen in der Ausleseeinrichtung.

10047556-102301

Die ladungstransparente Auslegung der Konvertereinrichtung gestattet es, daß die geladenen Teilchen ohne Verlust ihrer Ortsinformationen durch die Konvertierungseinrichtung(en) geleitet werden können. Somit folgt aus der Ladungstransparenz, daß der Erzeugungsort der geladenen Teilchen in dem  
5 Zählgas unverzerrt durch die Konvertereinrichtung(en) auf die vorzugsweise ortsempfindliche Ausleseeinrichtung abgebildet bzw. geleitet wird.

Nachfolgend wird die Erfindung unter Bezugnahme auf die begleitenden Zeichnungen beispielhaft beschrieben. Es zeigt:

10

Figur 1 eine schematische Schnittansicht eines Detektors zum Nachweis von Neutronen gemäß einer Ausführungsform der Erfindung;

15

Figur 2a eine schematische, perspektivische Ansicht eines Detektors zum Nachweis von Neutronen gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung;

20

Figur 2b eine schematische, perspektivische Ansicht des in Figur 2a gezeigten Detektors, jedoch mit einer unterschiedlichen Ausleseeinrichtung;

Figur 2c eine schematische, perspektivische Ansicht des in Figur 2a gezeigten Detektors, jedoch mit einer weiteren unterschiedlichen Ausleseeinrichtung;

25

Figur 2d eine schematische, perspektivische Ansicht des in Figur 2a gezeigten Detektors, jedoch mit einer weiteren unterschiedlichen Ausleseeinrichtung;

30

Figur 3 eine schematische Schnittansicht durch eine Konvertereinrichtung, wobei Feldlinien des lokalen elektrischen Feldes schematisch gezeigt sind;

10047556-102301

Figur 4 eine schematische Schnittansicht samt perspektivischer Detailansicht einer Ausführungsform einer Tragvorrichtung für Konvertereinrichtungen; und

5 Figur 5 eine schematische, perspektivische Ansicht eines Detektors zum Nachweis von Neutronen gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung.

Figur 1 zeigt eine stark schematisierte Schnittansicht und Figur 2 schematische perspektivische Ansichten eines Detektors zum Nachweis von Neutronen gemäß einer Ausführungsform der Erfindung. Anhand von Figuren 1 und 2 wird zunächst der Aufbau des Detektors beschrieben.

In einem Detektorgehäuse 10, welches Teil eines herkömmlichen Gasdetektors sein kann, ist ein (nicht dargestelltes) Gas bzw. Zählgas über eine Gaszufuhr 12 eingebracht. Zum Entlüften des Detektorgehäuses ist ferner eine Gasabfuhr 14 vorgesehen. Sämtliche für Gasdetektoren übliche Zählgase können zum Einsatz kommen. Es ist lediglich erforderlich, daß die bei der später zu beschreibenden Kernreaktion entstehenden Konvertierungsprodukte eine ionisierende Wirkung auf das Gas aufweisen. Als besonders geeignet haben sich Mischungen von Argon mit einer oder mehreren der Komponenten  $\text{CO}_2$  (10-90% Anteil),  $\text{CF}_4$ , Dimethylether, Isobutan und  $\text{CH}_4$  erwiesen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Helium-3-Neutronendetektoren ist es nicht notwendig, daß das Zählgas unter hohem Druck gehalten wird, sondern kann vorteilhafterweise unter Normaldruck in das Detektorgehäuse 10 eingebracht sein.

In der Oberseite des Detektorgehäuses 10 ist ein Eintrittsfenster 16 eingelassen. Da der gezeigte Detektor vorzugsweise nicht mit einem erhöhten Zählgasdruck betrieben wird, kann das Eintrittsfenster 16 sehr dünn ausgebildet sein, so daß es nur einen geringen Wirkungsquerschnitt für die Absorption der einfallenden Neutronen aufweist. Zudem werden die einfallenden Neutronen nur sehr geringfügig durch das dünne Eintrittsfenster abgelenkt. In dem Detektorgehäuse 10 ist angrenzend an oder in der Nähe hiervon das Eintrittsfenster 16 eine

10047556-102301

Driftelektrode 18 angeordnet, welche Teil einer Driffelderzeugungseinrichtung ist. Zwischen der Driftelektrode 18 und einer später zu beschreibenden Ausleseeinrichtung 19 kann über eine (nicht dargestellte) Spannungsquelle ein elektrisches Driffeld für elektrisch geladene Teilchen angelegt werden, wobei die

5 Driftelektrode bezüglich der Ausleseeinrichtung 19 mit einer negativen Spannung beaufschlagt wird. An der Driftelektrode 18 kann optional eine Schicht 20 eines festen Neutronenkonverters, beispielsweise eine Bor-10 Schicht, angebracht sein.

In den in Figuren 1 und 2 gezeigten Ausführungsformen des erfindungsgemäßen

10 Detektors umfaßt die Driffelderzeugungseinrichtung die Driftelektrode 18 als erste Elektrode und die Ausleseeinrichtung als (strukturierte) zweite Elektrode. Es ist jedoch ebenfalls möglich, statt einer Verwendung der Ausleseeinrichtung 19 als die zweite Elektrode eine davon getrennte zweite Driftelektrode vorzusehen. Ferner kann die Funktion der Driftelektrode 18 auch von einer leitfähigen Schicht

15 der dazu benachbarten Konvertereinrichtung 22 übernommen werden, so daß auf die Driftelektrode 18 verzichtet werden kann.

In dem Detektorgehäuse 10 sind ferner drei kaskadiert übereinander angeordnete Konvertereinrichtungen 22 vorgesehen. Die Konvertereinrichtungen 22 befinden

20 sich im wesentlichen in dem zwischen der Driftelektrode 18 und der Ausleseeinrichtung 19 erzeugten Driffeld. Wie insbesondere in Figur 3 dargestellt ist, sind die Konvertereinrichtungen 22 vorzugsweise schichtartig aufgebaut und bestehen beispielsweise aus einer sogenannten GEM-Folie (s.o.), welche ein- oder beidseitig mit einer festen Konverterschicht 24 - hier einer

25 Neutronenkonverterschicht aus Bor-10 - beschichtet ist. Vorzugsweise ist die Konverterschicht 24 im wesentlichen homogen aufgetragen, wobei jedoch die Konverterschicht 24 auch nur bereichsweise oder in verschiedenen Schichtdicken aufgetragen sein kann. Jede der Konvertereinrichtungen 22 umfaßt eine

30 Isolatorschicht 26, beispielsweise eine Polyimidfolie. Besonders bewährt haben sich Kaptonfolien (Kapton ist eine Marke des Unternehmens DUPONT). Die Isolatorschicht 26 ist beidseitig mit einem leitfähigen Material, beispielsweise Kupfer, beschichtet, so daß sie zwischen einer ersten leitfähigen Schicht 28 und einer zweiten leitfähigen Schicht 30 angeordnet ist. Die beiden elektrisch

10047556-103301

leitfähigen Schichten 28 und 30 sind durch die Isolatorschicht 26 elektrisch gegeneinander isoliert. Ferner weist die Konvertereinrichtung 22 eine Vielzahl von matrixartig angeordneten Durchgängen 32 auf, durch welche elektrisch geladene Teilchen in noch zu beschreibender Weise driften können. Das  
5 Anordnungsmuster dieser Durchgänge 32, welche die Konvertereinrichtungen 22 in Normalenrichtung der Schichtebene durchsetzen, ist schematisch in Figur 2 dargestellt.

Der konstruktive Aufbau, die elektrische Beschaltung sowie die Herstellung der  
10 GEM-Folien, aus welchen in einfacher Weise bevorzugte erfindungsgemäße Konvertereinrichtungen 22 erstellt werden können, ist detailliert in US-A-6 011 265 sowie in der Veröffentlichung von F. Sauli, "GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 386 (1997), Seiten 531-534 beschrieben. Um eine Wiederholung  
15 sämtlicher dort beschriebener Aspekte und Eigenschaften von GEM-Folien zu vermeiden, wird nachfolgend in vollem Umfang auf die Offenbarung dieser angegebenen Druckschriften Bezug genommen. Somit stellt die Beschreibung insbesondere des Aufbaus, der elektrischen Beschaltung und der Herstellung der GEM-Folien in den genannten Druckschriften ein integraler Bestandteil der  
20 Offenbarung dieser Erfindung dar. Bei den in den angegebenen Druckschriften beschriebenen GEM-Folien (gas electron multiplier-Folien) handelt es sich im wesentlichen um beidseitig mit Kupfer beschichtete Kaptonfolien, welche 1997 am CERN von F. Sauli entwickelt wurden. Mittels eines photolithographischen Verfahrens wird in diese GEM-Folien eine regelmäßige Lochstruktur geätzt, wobei  
25 Kupferober- und Unterseite der Folien elektrisch nicht miteinander verbunden sind.

Dem Eintrittsfenster 16 und der Driftelektrode 18 in dem Detektorgehäuse 10 gegenüberliegend ist die Ausleseeinrichtung 19 derartig angeordnet, daß die  
30 kaskadierten Konvertereinrichtungen 22 stapelartig dazwischen angeordnet sind. Die Flächennormalen des Eintrittsfensters 16, der Driftelektrode 18, der Konvertereinrichtungen 22 sowie der Ausleseeinrichtung 19 fallen bevorzugt im wesentlichen zusammen. Die mittlere Feldrichtung des elektrischen Driftfeldes

10047556-102301

zwischen benachbarten Konvertereinrichtungen 22 ist im wesentlichen senkrecht zu den Schichtebenen der Konvertereinrichtungen 22, so daß sie der Längsachse der lochartigen Durchgänge 32 folgt. Die Driftelektrode 18 sowie die Ausleseeinrichtung 19 sind von den Konvertereinrichtungen 22 beabstandet, wobei der Zwischenraum durch das Zählgas gefüllt ist.

Als Ausleseeinrichtung 19 können sämtliche herkömmliche Detektorsysteme verwendet werden, mit welchen geladene Teilchen, insbesondere Elektronen, nachweisbar sind. Beispielsweise sind als Ausleseeinrichtung 19 kammartig bzw. interdigital ineinandergreifende Elektrodenstrukturen einsetzbar, welche schematisch in Figur 2a und Figur 2b dargestellt sind. Es sind jedoch auch Vieldrahtgaskammern oder ähnliche Detektoren einsetzbar. Zum Nachweis der eingefangenen geladenen Teilchen - hier Elektronen - wird in herkömmlicher Weise mit einer (nicht dargestellten) Nachweiselektronik ein Spannungssignal zwischen den beiden interdigitalen Elektroden ausgewertet.

Neben kammartigen und interdigitalen Auslesestrukturen (vgl. Figuren 2a und 2b), welche nur die Ortsinformationen in einer Dimension liefern, sind gleichermaßen zueinander gekreuzte Auslesestrukturen interessant, die eine Ortsauflösung in zwei Raumdimensionen liefern. Eine derartig modifizierte Ausleseeinrichtung 19 ist schematisch in Figur 2c dargestellt. Hierbei sind zwei zueinander gekreuzte Auslesestrukturen an Ober- und Unterseite einer Trägerplatte angeordnet. Ebenso sind - vor allem für Streuexperimente - ringförmige Auslesestrukturen interessant, da diese über den gesamten Azimutwinkel integrieren und die gesamte Intensität für einen Streuwinkel liefern. Eine derartige Ausleseeinrichtung 19 mit ringförmiger Auslesestruktur ist in Figur 2d gezeigt.

Figur 4(a) ist eine schematische Schnittansicht einer bevorzugten Trageinrichtung 36, mit welcher eine Vielzahl kaskadenartig angeordneter Konvertereinrichtungen 22 in dem Detektorgehäuse 10 angebracht werden können. Die Trageinrichtung 36 weist vier beispielsweise aus einem Keramikmaterial bestehende Befestigungsstützen 38 auf, welche an einer Grundplatte 40 festgelegt sind. An jeder der Befestigungsstützen 38 ist ein Eckabschnitt eines im wesentlichen

10047556 - 102301



rechteckig ausgelegten Spannrahmens 42 ang gebracht.

- Wie in der perspektivischen Explosionsansicht von Figur 4(b) dargestellt ist, weist der Spannrahmen 42 ein oberes 44 und ein unteres 46 Rahmenelement auf. Die
- 5 Rahmenelemente 44 und 46 bestehen aus einem leitfähigen Material, beispielsweise Edelstahl. Zwischen den Rahmenelementen 44, 46 ist eine der Konvertereinrichtungen 22 unter einer derartigen mechanischen Zugspannung gehalten, daß sie im wesentlichen glatt und ohne Faltenwurf festgelegt ist. Zwischen jeweiligen Schichtseiten der Konvertereinrichtung 22 und den
- 10 Rahmenelementen 44 und 46 sind U-förmige Isolierelemente 48, beispielsweise Kaptonfolien, eingebracht, welche einen direkten Kontakt zwischen den Rahmenelementen 44, 46 und den jeweiligen Schichtseiten der Konvertereinrichtung 22 nur bereichsweise ermöglichen. Hierdurch kann die Konvertereinrichtung derart in dem Spannrahmen 42 gehalten werden, daß
- 15 dessen oberes Rahmenelement 44 mit der ersten leitfähigen Schicht 24 und dessen unteres Rahmenelement 46 mit der zweiten leitfähigen Schicht elektrisch verbunden ist, während die Rahmenelemente 44 und 46 gegeneinander isoliert sind.
- 20 Nachfolgend wird die Funktionsweise der dargestellten Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Detektoren beschrieben. Die zu detektierenden Neutronen werden zumindest teilweise von den Konverterschichten 24 der Konvertereinrichtungen 22 absorbiert. Besteht die Konverterschicht 24 im wesentlichen aus isotoopenreinem Bor-10, welches sich als besonders geeignet
- 25 erwiesen hat, so zerfällt nach Absorption des Neutrons der Bor-10 Kern spontan in ein  $\alpha$ -Teilchen und einen Lithium-7 Kern. Da der Impuls des absorbierten Neutrons vergleichsweise klein und daher vernachlässigbar ist, werden das  $\alpha$ -Teilchen und der Lithium-7 Kern aufgrund der Impulserhaltung in entgegengesetzten Richtungen auseinanderfliegen. Zumindest eines dieser
- 30 Konvertierungsprodukte wird sich daher von der Schichtebene der Konvertereinrichtung 22 bzw. von der Konverterschicht 24 wegbewegen und das Zählgas ionisieren. Hierdurch werden insbesondere freie Elektronen in dem

10047556-102304

Zählgas erzeugt.

In Figur 1 sind derartige Ionisationsspuren der Konvertierungsprodukte schematisch dargestellt. Die durch diesen Vorgang generierten primären  
5 Elektronen stellen das eigentlich zu detektierende Signal dar. Die Ladungswolke der primären Elektronen wird von dem elektrischen Driftfeld, welches zwischen der Driftelektrode 18 und der Ausleseeinrichtung 19 angelegt ist, in Richtung der Ausleseeinrichtung 19 abgezogen. Zumindest teilweise müssen die erzeugten Elektronen eine oder mehrere der Konvertierungseinrichtungen 22 passieren, um  
10 zu der Ausleseeinrichtung 19 zu gelangen. Ermöglicht wird dies durch die Ladungstransparenz der Konvertereinrichtungen 22, welche es den primären Elektronen gestattet, ohne Verlust ihrer Ortsinformationen zu der Ausleseeinrichtung 19 zu gelangen, so daß mittels eines orts aufgelösten Nachweises dieser Elektronen durch die Ausleseeinrichtung 19 auch auf den  
15 Ionisationsort des Zählgases - und damit den Absorptionsort des zu detektierenden Neutrons - geschlossen werden kann.

Wie detailliert in US-A-6-011 265 sowie der oben genannten Veröffentlichung von F. Sauli ausgeführt ist, weisen GEM-Folien bei geeigneter elektrischer  
20 Beschaltung ladungstransparente Eigenschaften auf. So schnüren sich, wie schematisch in Figur 3 dargestellt ist, die elektrischen Feldlinien des Driftfeldes im Bereich der Durchgänge 32 der Konvertereinrichtungen 22 zusammen, wenn eine den Driftvorgang unterstützende Potentialdifferenz zwischen der ersten leitfähigen Schicht 28 und der zweiten leitfähigen Schicht 30 angelegt wird. In Feldrichtung  
25 hinter den Durchgängen 32 der Konvertereinrichtungen 22 weiten sich die elektrischen Feldlinien symmetrisch wieder auf. Ein Primärelektron, welches durch die ionisierende Wirkung eines Konvertierungsprodukts in dem Zählgas erzeugt wurde, folgt dem Verlauf einer der in Figur 3 dargestellten Feldlinien und kann so durch den Durchgang 32 bei Erhalt seiner Ortsinformation durch eine oder  
30 mehrere Konvertereinrichtungen 22 "geschleust" werden.

Im Gegensatz zu der Betriebsweise der GEM-Folien, wie sie in den genannten Druckschriften beschrieben ist, wird die Potentialdifferenz zwischen der ersten

10047556-102301

- leitfähigen Schicht 28 und der zweiten leitfähigen Schicht 30, welche über eine Konverterfelderzeugungseinrichtung elektrisch miteinander verbunden sind, vorzugsweise klein gewählt. So ist es nicht erforderlich, im Bereich der Durchgänge 32 in den Konvertereinrichtungen 22 derartige Feldstärken aufzubauen, welche zu einer Gasverstärkung der Primärelektronen führen würden, da durch die Konvertierungsprodukte jedes einzelnen Neutrons ausreichend Primärelektronen für einen direkten Nachweis erzeugt werden. Folglich werden die Konvertereinrichtungen 22 nicht wie GEM-Folien als Gasverstärker mit Verstärkungsfaktoren zwischen 10 und 100 beschaltet, sondern arbeiten ohne Verstärkung (Verstärkung = 1). Wegen der zur Verfügung stehenden Gesamtenergie der Konvertierungsprodukte ist eine Verstärkung somit nicht oder nur in geringem Maße notwendig, so daß eine sehr hohe Betriebsstabilität und Lebensdauer des Detektors erreicht wird.
- Der beschriebene Aufbau der Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Detektors für Neutronen gestattet vorteilhafterweise die Nutzung eines festen Neutronenkonverters. Derartige feste Neutronenkonverter, beispielsweise Konverterschichten aus Bor-10, sind aus prinzipiellen Gründen sehr viel besser für einen effizienten Nachweis von Neutronen geeignet, da die Dichte der Konverteratome in einem festen Neutronenkonverter etwa 1000fach größer als in gasförmigen Convertern ist und so einen erheblich höheren Wirkungsquerschnitt für Neutronen aufweist. Bei herkömmlichen Neutronendetektoren führt die Verwendung von festen Konvertermaterialien jedoch zu Nachweisproblemen der geladenen Konvertierungsprodukte. Diese bleiben zu einem großen Teil schon in dem Konvertermaterial selbst stecken und können ihre Energie nur beschränkt an ein umgebendes Detektionsmedium (z.B. ein Zählgas) abgeben. Nachgewiesen werden können effektiv nur aus Oberflächenschichten herrührende Konvertierungsprodukte. Der Vorteil eines dichtgepackten Neutronenabsorbers in Form eines Festkörpers wird daher bei herkömmlichen Neutronendetektoren wieder durch die mangelnde Austrittswahrscheinlichkeit der geladenen Fragmente in das umgebende Detektionsmedium zunichte gemacht.

10047556-102301

Da der feste Neutronenkonverter und das Zählgas voneinander entkoppelt sind, kann das Zählgas unter Normaldruck eingesetzt werden, so daß kein Druckbehälter notwendig ist. Der Betrieb bei Normaldruck ermöglicht seinerseits den Bau beliebig großflächiger und vielfältig geformter Detektoren. Ein weiterer  
5 Vorteil besteht in der guten Zeitauflösung von unter einer Mikrosekunde, die mit festen Konverterschichten erreicht werden kann. Da die Flugzeit thermischer Neutronen durch eine feste Konverterschicht von z.B. 1 µm Dicke nur 0,5 Nanosekunden beträgt, ergibt sich eine theoretisch erzielbare bislang unerreichte Zeitauflösung von dieser Größenordnung.

10

Besonders vorteilhaft hat sich die Verwendung von Neutronendetektoren erwiesen, welche kaskadenartig angeordnete Konvertereinrichtungen 22 umfassen. So ist es hierdurch möglich, ein besonders günstiges Verhältnis der Oberfläche einer Konverterschicht zu seinem Konvertervolumen bereitzustellen.

15

Die Verwendung fester Neutronenkonverter zieht nämlich regelmäßig Probleme hinsichtlich des Nachweises der geladenen Konvertierungsprodukte nach sich. Diese Konvertierungsprodukte bleiben zu einem großen Teil bereits in dem festen Konverter selbst stecken und können ihre Energie nur in geringem Maße an ein umgebendes Detektionsmedium, wie z.B. ein Zählgas abgeben. Nachgewiesen  
20 werden können effektiv nur aus Oberflächenschichten herrührende Konvertierungsprodukte. Somit kann unter Umständen der Vorteil eines dichtgepackten Neutronenabsorbers in Form eines Festkörpers durch die geringe Austrittswahrscheinlichkeit der Konvertierungsprodukte in das umgebende Detektionsmedium zunichte gemacht werden.

25

Die ladungstransparente Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Konvertereinrichtungen 22 ermöglicht es jedoch vorzugsweise, mehrere Konvertereinrichtungen 22 kaskadenartig hintereinander zur Vervielfältigung bzw. Verbesserung der Nachweiseffizienz zu verwenden. Das eigentliche  
30 Ionisationssignal, d.h. die gebildeten primären Elektronen, können aufgrund der Ladungstransparenz die Konvertereinrichtungen 22 unter Erhalt ihrer Ortsinformationen durchdringen, so daß das gesamte Elektronensignal zum Nachweis der absorbierten Neutronen herangezogen werden kann. Bei einer

10047556 - 102301

Verwendung von Bor-10 als Konvertermaterial in den Konverterschichten 24 eines erfindungsgemäßen Detektors, welcher 10 beiseitig beschichtet, kaskadiert Konvertereinrichtungen 22 umfaßt, erhält man beispielsweise eine Nachweiseffizienz von 75% für 2 meV-Neutronen, 50% für 25 meV-Neutronen, 5 35% für 100 meV-Neutronen und etwa 25% für 200 meV-Neutronen. Diese hohen Nachweiseffizienzen des erfindungsgemäßen Detektorsystems sind mit denjenigen von Hochdruck-Helium-3-Gasdetektoren vergleichbar.

Die Primärladung, die in der Kaskade der ladungstransparenten 10 Konvertereinrichtungen 22 erzeugt wird, kann - wie beschrieben - von einem beliebigen Elektrodenarray als Ausführung der Ausleseeinrichtung 19 nachgewiesen werden. Durch die Art und Form der Ausleseeinrichtung 19 ergibt sich in einfacher Weise das räumliche Auflösungsvermögen. Aus der Form und Dauer typischer Ladungspulse ergibt sich eine typische Zählratenakzeptanz von 15 etwa 10 Millionen Neutronen pro Sekunde und Pixel. Die Größe eines Pixel und damit das räumliche Auflösungsvermögen ist durch die Reichweite der geladenen Konvertierungsprodukte bei üblichen Zählraten unter Normaldruck auf etwa 2 mm x 2 mm beschränkt. Somit weist das hier vorgestellte erfindungsgemäße Detektorkonzept eine etwa 1000-mal größere Ratenakzeptanz pro Bildpunkt und 20 eine 10-mal besseres lineares Ortsauflösungsvermögen als bisherige Helium-3 Gasdetektoren für Neutronen auf.

Ein weiterer Vorteil der Erfindung liegt darin begründet, daß bei dem erfindungsgemäßen Detektor auf den Einsatz von Materialien mit hoher 25 Kernladungszahl verzichtet werden kann. Dadurch ergibt sich eine inhärente Unempfindlichkeit für Gamma- und Röntgenstrahlung. Beim Einsatz von beispielsweise Bor-10 als aktivem Konvertermaterial lassen sich die Signale darüber hinaus wegen der Form des Pulshöhenspektrums ohne Probleme gegen den verbleibenden Röntgen- und Gammauntergrund diskriminieren. Der 30 erfindungsgemäße Detektor ist in seiner Ausführungsform als Neutronendetektor folglich für Gamma- und Röntgenstrahlung unempfindlich.

10047556-102201  
T0E20T-955400T

Die Konvertereinrichtungen 22 können insbesondere in einfacher Weis aus herkömmlichen GEM-Folien hergestellt werden, in dem ein oder vorzugsweise beide Oberflächen der GEM-Folie mit Konverterschichten 24 versehen werden. Als besonders geeignet für die Herstellung derartiger Konvertereinrichtungen 22 hat sich ein Elektronenstrahlverdampfen von pulver- oder granulatartigem und isotonenreinem Bor-10 erwiesen. Eine Schichtdicke von ca. 3 µm der Bor-10 Schicht stellt ein Optimum für das Verhältnis aus der Neutronen-Absorptionswahrscheinlichkeit und der Entkommwahrscheinlichkeit der geladenen Konvertierungsprodukte aus dem festen Konveter in das Zählgas dar, da die maximale Reichweite der geladenen Konvertierungsprodukte in Bor-10 lediglich etwa 3,5 µm beträgt.

Wie bereits oben erwähnt, erlaubt der Einsatz fester Konverterschichten 24 eine bisher unerreichte Steigerung der Zeitauflösung des Detektors. Dazu ist es besonders vorteilhaft, eindeutig diejenige feste Konverterschicht 24 bzw. diejenige Konvertereinrichtung 22 identifizieren zu können, die das entsprechende Neutron absorbiert hat. Im Fall einer Kaskade von ladungstransparenten, festen Konverterschichten 24, wie z.B. in Form der hier vorgeschlagenen insbesondere mit Bor beschichteten GEM-Folien, kann dies beispielsweise durch einfaches zusätzliches Auslesen jeder GEM-Folie mittels eines Vorverstärkers realisiert werden (vgl. Fig. 5).

Jede Konvertereinrichtung 22 der Kaskade, die am Transport der im Detektor entstandenen Ladung bis hin zur Ausleseeinrichtung 19 beteiligt ist, produziert nämlich einen elektrischen Strompuls, der mittels eines Vorverstärkers verstärkt und detektiert werden kann. Durch explizites Auslesen aller Signale an allen Konvertereinrichtungen 22 kann diejenige feste Konverterschicht 24 eindeutig identifiziert werden, die das Neutron absorbiert hat.

Falls alle Konvertereinrichtungen 22 beidseitig mit einem festen Konverter beschichtet sind, kann somit eine Zeitauflösung erreicht werden, die der benötigten Flugzeit für die Strecke zwischen zwei aufeinanderfolgenden GEM-Folien entspricht (z.B. bei einem Abstand von 2 mm zwischen zwei Folien ergibt

1004556-10001

dies eine Zeitauflösung von ca. einer Mikrosekunde). Sollten die Anforderungen an die Zeitauflösung von herausragender Bedeutung sein, so kann unter Inkaufnahme einer reduzierten Nachweiseffizienz bei lediglich einseitig beschichteten GEM-Folien eine Zeitauflösung bis zur theoretischen Grenze von ca. 0,5 Nanosekunden erreicht werden.

In Figur 5 ist eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Detektors dargestellt. Merkmale, welche identisch oder ähnlich zu denjenigen der vorangegangenen Ausführungsformen sind, sind mit gleichen Bezugszeichen versehen ohne daß eine erneute Beschreibung erfolgt. Die in Figur 5 gezeigte Ausführungsform zeichnet sich durch einen symmetrischen Aufbau bezüglich der Ausleseeinrichtung 19 aus. Hierdurch wird die Nachweiseffizienz bei gleichbleibender notwendiger Hochspannung an den beiden Driftelektroden 18, 50 gesteigert. Ferner wird jede Konvertereinrichtung 22 (d.h. Jede GEM-Folie) über einen Vorverstärker 52 ausgelesen, um - wie oben beschrieben - eine hohe Zeitauflösung zu erreichen.

Zusammenfassend verfügt der hier vorgestellte Detektor über einen außergewöhnlich großen dynamischen Bereich, bei seiner Verwendung als Neutronendetektor beispielsweise vom Einzelneutronennachweis bis 10 MHz in jedem Pixel. Der Detektor ist durch den niedrigen Untergrund damit sowohl für den Nachweis einzelner Neutronen als auch für den Einsatz in bildgebenden Verfahren mit hohen Raten geeignet. Eine Nachweiseffizienz von etwa 50% kann ohne größeren Aufwand erreicht werden. Weiterhin besitzt der Detektor eine Zeitauflösung von ca. einer Mikrosekunde, welche unter Inkaufnahme einer Reduktion der Nachweiseffizienz (auf ca. 30%) enorm verbessert werden kann bis hin zu theoretisch ca. 0,5 Nanosekunden. Dabei bleibt die gesamte Konstruktion mechanisch einfach und kann unter Verwendung vielfältiger Materialien realisiert werden.

30

#### Bezugszeichenliste

10047556-102301

	10	Detektorgehäuse
	12	Zählgaszufuhr
	14	Zählgasabfuhr
5	16	Eintrittsfenster
	18	Driftelektrode
	19	Ausleseeinrichtung
	19'	Ausleseeinrichtung
	19"	Ausleseeinrichtung
10	19'''	Ausleseeinrichtung
	20	Schicht eines Neutronenkonverters auf der Driftelektrode
	22	Konvertereinrichtungen
	24	Konverterschicht
	26	Isolatorschicht
15	28	erste leitfähige Schicht
	30	zweite leitfähige Schicht
	32	Durchgänge
	34	Feldlinien
	36	Trageinrichtung
20	38	Befestigungsstützen
	40	Grundplatte
	42	Spannrahmen
	44	oberes Rahmenelement
	46	unteres Rahmenelement
25	48	Isolierelemente
	50	Driftelektrode
	52	Vorverstärker

10047556-102301



Anmelder: Universität Heidelberg  
"Detektor"  
Unser Zeichen: H 2154EU - ds / ro

5

### Ansprüche

1. Detektor zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen, insbesondere Neutronen, mit
- einem zumindest bereichsweise mit einem Zählgas gefüllten Detektorgehäuse (10),
  - zumindest einer in dem Detektorgehäuse (10) angeordneten Konvertereinrichtung (22), welche Konvertierungsprodukte aufgrund einer Absorption der zu detektierenden neutralen Teilchen erzeugt, wobei die Konvertierungsprodukte elektrisch geladene Teilchen in dem Zählgas erzeugen,
  - zumindest einer Ausleseeinrichtung (19) zum Nachweis der elektrisch geladenen Teilchen,
  - zumindest einer Driffelderzeugungseinrichtung (18) zum Erzeugen eines derartigen elektrischen Driffeldes für die elektrisch geladenen Teilchen in zumindest einem Volumenbereich des Zählgases, daß die elektrisch geladenen Teilchen zumindest teilweise zu der Ausleseeinrichtung (19) driften,
- wobei die Konvertereinrichtung (22) ladungstransparent ausgelegt und derartig in dem Detektorgehäuse (10) angeordnet ist, daß sie von dem Driffeld zumindest teilweise durchsetzt ist.
2. Detektor nach Anspruch 1, wobei die Konvertereinrichtung (22) eine Vielzahl von vorzugsweise statistisch oder matrixartig angeordneten Durchgängen (32) für die elektrisch geladenen Teilchen aufweist.
3. Detektor nach Anspruch 2, wobei die Durchgänge (32) einen Minstdurchmesser zwischen 10  $\mu\text{m}$  bis 1000  $\mu\text{m}$ , vorzugsweise 25  $\mu\text{m}$  bis 500  $\mu\text{m}$  und einen Mindestabstand von 10  $\mu\text{m}$  bis 500  $\mu\text{m}$ , vorzugsweise 50  $\mu\text{m}$  bis 300  $\mu\text{m}$  aufweisen.

10047556-102301

4. Detektor nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei der Detektor eine Vielzahl, vorzugsweise 2 bis 20, am meisten bevorzugt 10, der kaskadiert angeordneten Konvertereinrichtungen (22) umfaßt.

5

5. Detektor nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei ein für die Konvertierung aktiver Bereich der Konvertereinrichtung (22) flächenartig ausgelegt und bevorzugt im wesentlichen senkrecht in dem Driftfeld angeordnet ist.

10

6. Detektor nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Driftfelderzeugungseinrichtung (18) eine flächenartige, gegebenenfalls strukturierte Driftelektrode (18) aufweist, um das Driftfeld zwischen der Driftelektrode (18) und der Ausleseeinrichtung (19) zu erzeugen.

15

7. Detektor nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Konvertereinrichtung (22) eine erste (28) und zweite (30) leitfähige Schicht, welche durch eine dazwischen angeordnete Isolatorschicht (26) gegeneinander elektrisch isoliert sind, und zumindest eine vorzugsweise an der ersten (28) und/oder zweiten (30) leitfähigen Schicht angeordnete Konverterschicht (24) umfaßt.

20

8. Detektor nach Anspruch 7, wobei die erste (28) und zweite (30) leitfähige Schicht mit einer Konverterfelderzeugungseinrichtung elektrisch verbunden sind.

25

9. Detektor nach Anspruch 7 oder 8, wobei die Konverterschicht (24) eine Neutronenkonverterschicht ist, welche insbesondere Lithium-6, Bor-10, Gadolinium-155, Gadolinium-157 und/oder Uran-235 enthält.

30

10. Detektor nach Anspruch 7 bis 9, wobei die Konverterschicht (24) eine Schichtdicke von 0,1 µm bis 10 µm, vorzugsweise für eine im wesentlichen

10047556-102301

5 aus Bor-10 bestehende Neutronenkonverterschicht zwischen 0,5  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$ , am meisten bevorzugt etwa 1  $\mu\text{m}$ , die erste und zweite leitfähige Schicht eine Schichtdicke von 0,1  $\mu\text{m}$  bis 20  $\mu\text{m}$ , vorzugsweise 0,2  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  und die Isolatorschicht eine Schichtdicke von 10  $\mu\text{m}$  bis 500  $\mu\text{m}$ , vorzugsweise 25  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$  aufweist.

10 11. Konvertereinrichtung (22) für einen Detektor zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen, insbesondere Neutronen, mit einer ersten (28) und zweiten (30) leitfähigen Schicht, welche durch eine dazwischen angeordnet Isolatorschicht (26) gegeneinander elektrisch isoliert sind, und zumindest eine bevorzugt an der ersten (28) und/oder zweiten (30) leitfähigen Schicht angeordnete feste Konverterschicht (24), wobei die Konvertereinrichtung (22) eine Vielzahl von vorzugsweise matrixartig angeordneten Durchgängen (32) für elektrisch geladene Teilchen aufweist.

15 12. Konvertereinrichtung nach Anspruch 11, wobei die Konvertereinrichtung (22) ein Neutronenkonvertermaterial, insbesondere Lithium-6, Bor-10, Gadolinium-155, Gadolinium-157 und/oder Uran-235 enthält.

20 13. Verfahren zur Herstellung einer Konvertereinrichtung (22) für einen Detektor zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen, insbesondere Neutronen, mit den Schritten:

25 - Vorsehen einer zwischen zwei elektrisch leitfähigen Schichten (28, 30) angeordneten Isolatorschicht (26), so daß die elektrisch leitfähigen Schichten (28, 30) gegeneinander elektrisch isoliert sind und  
- Vorsehen einer Konverterschicht (24), insbesondere einer Neutronenkonverterschicht.

30 14. Detektionsverfahren zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen, insbesondere Neutronen, mit den Schritt n:

- Auffangen der zu detektierenden elektrisch neutralen Teilchen mit zumindest einer Konvertereinrichtung (22), welche bei Absorption der

10047556-102301

neutralen Teilchen Konvertierungsprodukte erzeugt;

- Erzeugen von elektrisch geladenen Teilchen in einem Zählgas durch die Konvertierungsprodukte;
- Ableiten der elektrisch geladenen Teilchen in einem elektrischen Driftfeld zu einer Ausleseeinrichtung (19), wobei die elektrisch geladenen Teilchen zumindest teilweise durch die ladungstransparente Konvertereinrichtung (22) hindurchgeleitet werden, insbesondere durch eine Vielzahl vorzugsweise matrixartig angeordneter Durchgänge (32) in der Konvertereinrichtung (22); und
- Nachweisen der elektrisch geladenen Teilchen in der Ausleseeinrichtung (19).

5

10

15

10047556 - 102301

23. Oktober 2001

Anmelder: Universität Heidelberg  
"Detektor"  
Unser Zeichen: H 2154EU - ds / ro

5

### Zusammenfassung

- Die Erfindung betrifft einen Detektor zum Nachweis elektrisch neutraler Teilchen, insbesondere Neutronen, mit
- einem mit einem Zählgas gefüllten Detektorgehäuse (10),
  - zumindest einer in dem Detektorgehäuse (10) angeordneten Konvertereinrichtung (22), welche Konvertierungsprodukte aufgrund einer Absorption der zu detektierenden neutralen Teilchen erzeugt, wobei die Konvertierungsprodukte elektrisch geladene Teilchen in dem Zählgas erzeugen,
  - zumindest einer Ausleseeinrichtung (19) zum Nachweis der elektrisch geladenen Teilchen,
  - zumindest einer Driftfelderzeugungseinrichtung (18) zum Erzeugen eines derartigen elektrischen Driftfeldes für die elektrisch geladenen Teilchen in zumindest einem Volumenbereich des Zählgases, daß die elektrisch geladenen Teilchen zumindest teilweise zu der Ausleseeinrichtung (19) driften,
- wobei die Konvertereinrichtung (22) ladungstransparent ausgelegt und derartig in dem Detektorgehäuse (10) angeordnet ist, daß sie von dem Driftfeld zumindest teilweise durchsetzt ist.

(Figur 1).

10047556-102301